ÜBER DIE GENAUIGKEIT DER WAHRNEHMUNG UND AUSFÜHRUNG VON AUGENBEWEGUNGEN.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DER MEDIZINISCHEN DOKTORWÜRDE ○ VORGELEGT DER **HOHEN MEDIZINISCHEN FAKULTAET DER ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT** ○○○ ZU **FREIBURG IM BREISGAU** ○○○

VON

KLARA GRIM

▫ AUS TRIER. ▫

ACAD. MEDICAE BIBL.

Gedruckt mit Genehmigung der mediz. Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg in Baden.

Dekan:
Professor Dr. de la Camp.

Referent:
Geh. Rat Professor Dr. von Kries.

Sonderabdruck aus
„Zeitschrift für Sinnesphysiologie".
Bd. 45.
Verlag von Johann Ambrosius Barth in Leipzig.

(Aus dem physiologischen Institut zu Freiburg i. B.)

Über die Genauigkeit der Wahrnehmung und Ausführung von Augenbewegungen.

Von
Klara Grim.

Wie bekannt, ist unser Sehorgan mehr als irgend ein anderes Sinneswerkzeug für die Wahrnehmung räumlicher Verhältnisse eingerichtet und geeignet. Es steht damit in Zusammenhang, dafs auch die Bewegungen des Auges, die ja an jenen Wahrnehmungen jedenfalls einen grofsen Anteil haben, eine besonders hochgradige Genauigkeit und Feinheit der Regulierung aufweisen. Obwohl über die Richtigkeit dieser Tatsache kaum Zweifel bestehen werden, so stöfst es doch auf mancherlei Schwierigkeiten, für die Präzision der Augenbewegungen, für die Genauigkeit, mit der sie ausgeführt oder wahrgenommen werden, bestimmte Mafse zu gewinnen. Ich habe die in dieser Richtung vorliegenden Angaben auf Vorschlag von Herrn Professor von Kries in einigen Hinsichten durch neue Beobachtungen zu ergänzen versucht, möchte jedoch, ehe ich über diese berichte, zunächst einen kurzen Überblick über die bereits vorliegenden älteren Beobachtungen geben, die sich auf diesen Gegenstand beziehen.

Eine der einfachsten und der experimentellen Beantwortung am leichtesten zugänglichen Fragen, die mit unserem Gegenstande jedenfalls in Zusammenhang steht, ist die, von welcher Art oder von welchem Betrage die Bewegungen äufserer Gegenstände sein müssen, damit wir sie als bewegt erkennen können, die Frage nach den Schwellenwerten der Bewegung. Bestimmungen dieser Art sind zuerst von Aubert[1] ausgeführt worden. Das Prinzip

[1] *Pflügers Archiv* **39**, S. 186. *Ebenda* **40**, S. 459.

derselben war durchweg das, die Geschwindigkeit einer solchen Bewegung zu verändern, somit eine an der Grenze der Wahrnehmbarkeit stehende und als Schwellenwert zu bezeichnende Geschwindigkeit zu ermitteln. Es zeigte sich dabei freilich sogleich, dafs die zu erhaltenden Werte von mancherlei Umständen in hohem Grade abhingen. Am einfachsten liegen die Dinge, wenn eine feste Marke fixiert wird und Gegenstände, die in kleinerer oder gröfserer Entfernung von dieser sich befinden, mit wechselnden Geschwindigkeiten bewegt werden. Wie zu erwarten, findet sich alsdann die Geschwindigkeitsschwelle um so höher, je weiter exzentrisch die beobachtende Netzhautstelle gelegen ist. So fand Aubert, dafs der Schwellenwert sich bei einem Abstande von 15′ auf nicht ganz eine Bogenminute (54 Sek.) in der Zeitsekunde belief, mit zunehmender Exzentrizität wuchs und bei einem Abstande von 9° vom Fixationspunkt auf 13—18′ pro Sekunde gewachsen war.

Streng genommen haben jedoch diese Beobachtungen wohl mit der Bewegung der Augen keinen ganz unmittelbaren Zusammenhang, da ja bei den hier gestellten Versuchsbedingungen solche nicht ausgeführt werden sollen und wohl auch tatsächlich nicht ausgeführt werden. Anders verhält es sich, wenn es sich um die Wahrnehmung der Bewegung eines Punktes handelt, den wir fixieren, und dem wir mit dem Blicke folgen dürfen. Auch nach diesem Prinzip sind zunächst von Aubert Versuche ausgeführt worden. Sie ergaben, dafs, wie auch nicht überraschend, die Wahrnehmung, ob ein bestimmter Punkt sich bewegt oder ruht, in ganz entscheidender Weise davon abhängt, ob aufser diesem Punkte und in seiner Nachbarschaft andere ruhende und als ruhend bekannte Gegenstände vorhanden sind oder nicht. So fand Aubert, dafs bei Vorhandensein solcher Objekte die Bewegung eines Punktes sogleich sichtbar war, wenn ihre Geschwindigkeit etwa 1′—2′ in der Sekunde betrug. Dieser Schwellenwert stieg auf das Zehnfache, wenn das betreffende Objekt durch den Schlitz eines vor dem Auge angebrachten schwarzen Kästchens beobachtet wurde, wobei jedoch die Ränder dieses Schlitzes immer noch als ruhende Nachbarobjekte in Betracht kommen und die Wahrnehmung der Bewegung erleichtern mufsten. Eine in dieser Beziehung ganz einwandfreie Beobachtung erhält man erst, wenn man in einem sonst völlig dunklen Raume ein allein wahrnehmbares leuchtendes Pünktchen anbringt,

diesem Bewegungen von verschiedener Geschwindigkeit und verschiedenem Umfange mitteilt und unter diesen Umständen die Wahrnehmbarkeit der Bewegung prüft. Auch nach diesem Prinzip sind von AUBERT Versuche angestellt worden. Sie stiefsen jedoch auf Schwierigkeiten besonderer Natur. Es zeigte sich, „dafs man einerseits bisweilen fest überzeugt ist, Bewegungen zu sehen, wenn keine objektiven Bewegungen vorhanden sind, andererseits recht lebhafte objektive Bewegungen nicht empfunden und überhaupt nicht bemerkt worden". Die erstere von AUBERT als autokinetische Empfindungen bezeichnete Erscheinung erschwerte bei seiner Versuchsanordnung infolge der Möglichkeit der Verwechslung mit wirklicher Bewegung in hohem Mafse die Gewinnung von Schwellenwerten.

Versuche ähnlicher Art sind dann später noch von BOURDON[1] angestellt worden, der die autokinetischen Empfindungen zwar auch bemerkte, jedoch nicht in dem Grade störend fand, dafs sie die Feststellung bestimmter Schwellenwerte unmöglich gemacht hätten. Er gibt an, dafs Bewegungen eines leuchtenden Objekts im sonst dunklen Raume im allgemeinen richtig wahrgenommen werden, wenn ihre Geschwindigkeit 14—21 Winkelminuten in der Sekunde beträgt. Diese Angaben resp. die Versuche, auf denen sie beruhen, sind jedoch noch mit einem anderen Bedenken behaftet. Es versteht sich nämlich von selbst, dafs jede Bewegung, sofern sie dauernd in derselben Richtung fortgesetzt wird, mit voller Sicherheit wahrnehmbar werden mufs, wenn wir sie nur lange genug andauern lassen. Um irgendwelche bestimmten Ergebnisse zu erhalten, müfste man also Zeit oder Umfang der Bewegung irgendwie willkürlich begrenzen (wodurch ein willkürliches Moment in die Versuchsbedingungen kommt) oder etwa im Anschlufs an AUBERT zu unterscheiden versuchen, ob die Bewegung sofort oder erst nach einiger Zeit wahrgenommen werden kann.

So können wir, wie ich glaube, von einer bestimmten Geschwindigkeit als dem Schwellenwerte für die Wahrnehmung einer Bewegung auf Grund der bisherigen Beobachtungen eigentlich nicht reden.

Als von einem ganz anderen Gesichtspunkte ausgehend, können sodann Untersuchungen hier angereiht werden, die haupt-

---

[1] La perception visuelle de l'espace. Paris, 1902.

sächlich durch die neueren Versuche von Basler[1] repräsentiert sind. Wir können nämlich (statt der Geschwindigkeit) auch den Umfang einer Bewegung uns verändert und zwar bis an die Grenze der Wahrnehmbarkeit vermindert denken. Die Geschwindigkeiten wären dabei wohl am zweckmäfsigsten so zu wählen, dafs sie für die Erkennung der Bewegung möglichst günstig sind. Die Untersuchungen des genannten Autors haben ergeben, dafs bei passender Geschwindigkeit der Bewegung (er wandte bei seinen Versuchen eine Bewegungsdauer von $^1/_{15}$ Sek. an) eine Erkennung schon bei einem Umfange von etwa 20 Bogensekunden möglich war, einem Umfange, der insbesondere erheblich kleiner ist als die geringste Entfernung, bei der zwei gleichzeitig gesehene Punkte oder Linien noch getrennt wahrgenommen werden können.

Überlegt man die theoretische Grundlage dieser Versuche, so wird es zweifelhaft erscheinen können, ob bei ihnen die Bewegung der Augen überhaupt ins Spiel kommt. Man wird vielmehr wohl richtiger sagen müssen, dafs hier die räumliche Unterscheidungsfähigkeit unter besonderen Bedingungen resp. nach einer besonderen Verfahrungsweise geprüft wird, ganz ähnlich wie z. B. Metzner und v. Frey[2] auch die räumliche Unterscheidungsfähigkeit auf der Haut mit simultanen und daneben mit sukzessiven Reizen geprüft haben. Auch schliefst sich das hier gefundene Ergebnis dem von diesen Beobachtern erhaltenen an, da auch sie die Sukzessivschwelle unter der Simultanschwelle liegend fanden.

Der Überblick über die älteren Versuche und die ihnen zukommende Bedeutung läfst erkennen, dafs es, um einen Anhalt für die Genauigkeit der Wahrnehmung von Augenbewegungen zu erhalten, darauf ankommen würde, die Geschwindigkeit zu verändern und einen Geschwindigkeitswert als Schwelle zu ermitteln, dafs es aber zur Erreichung dieses Zweckes notwendig ist, einerseits von den autokinetischen Empfindungen, andererseits auch von dem bei unbegrenzter Zeit dauernd wachsenden Umfange der Bewegung sich unabhängig zu machen. Als ein hierfür geeignetes Verfahren ergab sich das, die Bewegungen eines im sonst völlig dunklen Raume allein sichtbaren Pünktchens zu

---

[1] *Pflügers Archiv* **115**, S. 582. 1906. *Ebenda* **124**, S. 313. 1908.

[2] *Diese Zeitschrift* **26**, S. 33, 1901 und **29**, S. 164, 1902.

beobachten (ähnlich wie es schon AUBERT getan hat), diesem jedoch keine geradlinige, sondern eine Bewegung in geschlossener Bahn, am einfachsten eine kreisförmige zu erteilen. Es liefs sich erwarten, dafs hier bei bestimmter Gröfse der Kreisbahn eine bestimmte Geschwindigkeit (Umlaufszeit) für die Erkennbarkeit der Bewegung erforderlich sein und dafs auf diese Weise in der Tat zu Werten zu gelangen sein werde, die man als Geschwindigkeitsschwellen bezeichnen darf. Dies haben die Versuche in der Tat bestätigt.

Man hat hier für die Erkennbarkeit der Bewegung ein einfaches und sicheres Kriterium darin, dafs man über die Phase derselben in jedem Augenblick im klaren ist, d. h. anzugeben vermag, in welchem Teile seiner Bahn (oben oder unten, rechts oder links) der Lichtpunkt sich gerade befindet. Autokinetische Empfindungen können auch hier wohl gelegentlich auftreten und dem Beobachter ein langsames Wandern der ganzen kleinen Kreisbahn in einer Richtung vortäuschen. Sie hindern aber nicht die Schwelle zu ermitteln, bei der die Kreisbewegung wahrnehmbar wird.

Den erwähnten Bedingungen entsprechend wurde die nachstehend beschriebene Versuchsanordnung getroffen. Durch einen elektrischen Motor wird eine am Ende einer horizontal liegenden, drehbaren Achse befestigte runde Scheibe in Bewegung gesetzt. An dem anderen Ende der Achse ist ein kleiner Spiegel so angebracht, dafs er durch Schrauben aus der zur Achse senkrechten Lage in eine beliebige Winkelstellung gebracht werden kann. Der Spiegel macht die Drehungen der Achse mit; er ist nicht belegt und besteht zur Vermeidung doppelter Reflexion aus schwarzem Glas. Auf den Spiegel fällt durch eine runde, in ihrer Weite verstellbare Öffnung das Licht einer kleinen Glühlampe, die im übrigen vollständig abgedunkelt ist. Eine in der Öffnung angebrachte Mattglasscheibe dämpft das austretende Licht so weit, dafs es als Lichtquelle, die die umliegenden Gegenstände beleuchtete, nicht in Betracht kommen kann. Durch Veränderung der Neigung des Spiegels und der Stellung der Lichtquelle zu ihm läfst sich eine Einstellung erzielen, bei der das Bild des leuchtenden Punktes im rotierenden Spiegel eine annähernd kreisförmige Bahn von beliebiger Gröfse zurücklegt.

Der Ort der Beobachtung wechselt bei den verschiedenen Versuchen. Er ist immer so gewählt, dafs die Verbindungslinie

zwischen dem Auge des Beobachters und dem Mittelpunkte des Spiegels mit der Achse, an der der Spiegel befestigt ist, einen Winkel von 45° bildet. Ein genaues Einhalten der richtigen Entfernung zwischen Auge und Spiegelbild wird durch Anbringung eines Stativs gesichert, das eine Stütze für Kinn und Stirn besitzt.

Vom Orte der Beobachtung aus wird der Durchmesser der kreisförmigen Bahn, die der Lichtpunkt im rotierenden Spiegel beschreibt, direkt gemessen. Zu diesem Zwecke ist folgende Einrichtung getroffen. Eine in Glas gravierte Skala mit Millimetereinteilung wird seitlich vor den Beobachter, in ihrer Fläche parallel der Blicklinie aufgestellt und durch eine dahinter stehende Lichtquelle beleuchtet. Die von der Skala ausgehenden Strahlen fallen auf ein planparallel geschliffenes Deckgläschen, welches in der Richtung der Blicklinie in der Höhe des Auges angebracht ist. Indem es zur Blicklinie in einem Winkel von 45° geneigt steht, reflektiert es das Bild der Skala in den Spiegel, wo es mit dem des leuchtenden Punktes zur Deckung kommt, so dafs man dessen Gröfse resp. die seiner Exkursionen in absolutem Mafse ablesen kann. Voraussetzung dazu ist, dafs die virtuellen Spiegelbilder gleich weit vom Auge des Beobachters entfernt sind. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn bei kleinen Bewegungen des Auges keine parallaktische Verschiebung zwischen den Spiegelbildern stattfindet. Das Ablesen des Durchmessers der Bahn geschieht mittels eines Fernrohrs.

Der Zweck der Versuche, Feststellung eines Geschwindigkeitsschwellenwerts für Wahrnehmung von Bewegungen, erfordert eine weitgehende Möglichkeit der Abstufung der Geschwindigkeit. Im Groben ist diese ermöglicht durch Anwendung gröfserer oder kleinerer Übertragung zwischen Motor und Drehscheibe. Die feinere Einstellung mufs während des Versuchs, also im Dunkeln vom Platze des Beobachters aus geschehen. Zu diesem Zwecke wird in die Stromleitung ein Rheostat eingeschaltet, der leicht mit der Hand zu bedienen ist, ohne dafs der Beobachter genau über seine Einstellung orientiert ist, so dafs eine suggestive Beeinflussung ausgeschlossen ist. Um die gesuchte Geschwindigkeit herzustellen, kann man auf zweierlei Weise vorgehen: man kann entweder von einer überschwelligen Geschwindigkeit hinuntergehen oder auch von unterschwelligen Werten ausgehend durch allmähliche Steigerung der Geschwindigkeit diejenige erreichen, bei der die Bewegung zum ersten Male mit Sicherheit erkannt

werden kann. Da bei ersterem Vorgehen die Unsicherheit in der Beurteilung, welche bei allen derartigen Untersuchungen eine nicht unbeträchtliche Rolle spielt, bedeutend mehr zur Geltung kommt als bei der letzteren Art, ist bei den vorliegenden Versuchen stets nur Steigerung der Geschwindigkeit angewandt worden.

Von einer Messung der erreichten Geschwindigkeit auf mechanischem Wege ist wegen der Schwierigkeit der Einrichtung Abstand genommen worden. Die Umlaufszeit der Scheibe und damit die Geschwindigkeit der Kreisbewegung des Spiegelbildes ist durch Beobachtung der Dauer von je 10 Umdrehungen direkt mittels der Uhr festgestellt worden. Die Bewegungsgeschwindigkeit in der Sekunde ist $v = \frac{2\,r\,\pi}{\text{mittlere Umlaufszeit}}$, die Winkelgeschwindigkeit $= \frac{v}{E}$, wenn E die Entfernung des Beobachters vom Spiegelbilde ist.

Ich habe bei meinen Versuchen die Entfernung des Beobachters variiert und damit den scheinbaren Durchmesser der Kreisbahn (der absolut immer 3 mm betrug) variiert, die scheinbare Gröfse des Objekts aber konstant gehalten, indem dieses jenem Abstande proportional geändert wurde. Unter jeder Art von Bedingungen habe ich 50 Bestimmungen ausgeführt, deren Ergebnisse die nachstehenden Tabellen enthalten.

Sämtliche Versuche sind monokular mit dem astigmatischen aber korrigierten linken Auge, das volle Sehschärfe besitzt, ausgeführt worden.

Tabelle I.

Abstand des Spiegelbildes vom Beobachter = 1,50 m
Gröfse des Objekts = 1 mm = 2′17″
Durchmesser der Bahn = 3 mm = 6′52″
Umlaufszeiten für je 10 Umdrehungen:

22	22	21	28	28
28	21	20	26	27
27	25	28	22	26
22	22	26	22	27
23	28	28	22	28
20	27	25	22	25
20	22	27	23	28
22	24	27	21	24
24	22	27	20	24
22	20	28	22	27

Mittlere Umlaufszeit = 2,42 Sek.
Winkelgeschwindigkeit = 8′54″

Tabelle II.

Abstand des Spiegelbildes vom Beobachter = 3 m
Gröfse des Objekts = 2 mm = 2′17″
Durchmesser der Bahn = 3 mm = 3′26″
Umlaufszeiten für je 10 Umdrehungen:

20	20	20	18	17
19	21	20	18	18
19	23	20	17	19
21	22	18	20	18
18	20	21	18	19
20	21	20	21	18
18	22	18	22	20
18	20	19	19	18
20	23	18	20	18
18	21	18	18	20

Mittlere Umlaufszeit = 1,94 Sek.
Winkelgeschwindigkeit = 5′34″

Tabelle III.

Abstand des Spiegelbildes vom Beobachter = 6 m
Gröfse des Objekts = 4 mm = 2′16″
Durchmesser der Bahn = 3 mm = 1′43″
Umlaufszeiten für je 10 Umdrehungen:

15	18	15	16	16
18	19	16	15	15
16	20	16	16	16
17	18	17	14	17
17	16	16	16	17
16	17	15	17	16
15	17	16	16	15
15	16	17	14	14
15	16	16	15	16
17	16	16	17	15

Mittlere Umlaufszeit = 1,59 Sek.
Winkelgeschwindigkeit = 3′22″

Es bot einiges Interesse zu prüfen, ob und eventuell in welchem Betrage die Geschwindigkeitsschwellen sich ändern würden, wenn unter solchen Bedingungen gearbeitet wird, dafs (im Sinne der Duplizitätstheorie) nur der Dunkelapparat des Auges in Funktion ist, bei Lichtstärken also, die noch keine Farbenerkennung gestatten. Ich habe daher eine weitere Reihe von Versuchen in der hierfür erforderlichen Weise ausgeführt.

Die Versuchsanordnung war dabei im übrigen die gleiche. Sie unterschied sich nur dadurch, dafs kurzwelliges und zwar, da es den höchsten Dämmerungswert besitzt, blaues Licht von einer sicher unter dem Schwellenwert für direktes Sehen liegenden Lichtstärke benutzt wurde. Ferner sind die Versuche mit durch längeres Verweilen im Dunkeln dunkeladaptiertem Auge ausgeführt worden. Hierbei ergaben sich folgende Werte:

Tabelle IV.

Abstand des Spiegelbildes vom Beobachter = 1,50 m
Gröfse des Objekts = 1 mm = 2′17″
Durchmesser der Bahn = 3 mm = 6′52″
Umlaufszeiten für je 10 Umdrehungen:

15	15	15	15	15
12	17	16	15	15
17	18	18	15	14
14	15	14	13	16
15	13	18	15	17
16	16	14	16	16
14	20	17	16	18
17	16	18	17	16
17	17	17	17	15
18	18	17	17	18

Mittlere Umlaufszeit = 1,6 Sek.
Winkelgeschwindigkeit = 13′30″

Tabelle V.

Abstand des Spiegelbildes vom Beobachter = 3 m
Gröfse des Objekts = 2 mm = 2′17″
Durchmesser der Bahn = 3 mm = 3′26″
Umlaufszeiten für je 10 Umdrehungen:

11	12	11	10	12
11	13	11	12	11
12	11	11	11	13
11	12	12	13	14
10	14	13	12	14
12	11	14	13	13
13	12	12	12	12
11	10	11	11	12
13	11	11	12	14
14	10	12	14	12

Mittlere Umlaufszeit = 1,2 Sek.
Winkelgeschwindigkeit = 9′

Tabelle VI.

Abstand des Spiegelbildes vom Beobachter = 6 m
Gröfse des Objekts = 4 mm = 2′16″
Durchmesser der Bahn = 3 mm = 1′43″
Umlaufszeiten für je 10 Umdrehungen:

7	8	10	7	7
9	8	9	8	7
8	9	8	9	8
8	9	8	7	7
7	8	8	9	8
7	9	8	8	8
9	8	9	8	9
8	8	9	7	9
9	9	8	8	9
9	8	9	9	8

Mittlere Umlaufszeit = 0,82 Sek.
Winkelgeschwindigkeit = 6′36″

Stellen wir die Ergebnisse übersichtlich zusammen, so wäre zu sagen, dafs für kreisförmig bewegte Gegenstände die für eine Erkennung der Bewegung erforderliche Geschwindigkeitsschwelle um so niedriger liegt, je stärker die Bahn gekrümmt ist und in den untersuchten Bereichen (Durchmesser der Bahn 1,7—7′) sich für Beobachtungen bei etwas stärkerem Licht zwischen 3 und 9′ in der Sekunde bewegen, um beim Dämmerungssehen auf 6,5—13′ in der Sekunde zu wachsen.

Vergleicht man dies mit den eingangs erwähnten älteren Befunden, so zeigt sich in erster Linie, dafs die hier gefundenen Schwellenwerte beträchtlich niedriger sind als die von den früheren Autoren für gradlinige Bewegungen gefundenen. Bei gleicher Geschwindigkeit wird also eine gekrümmte Bewegung erheblich leichter wahrgenommen, als eine in derselben Richtung sich fortsetzende. Damit steht es im Einklange, dafs auch innerhalb meiner Beobachtungen die Schwellenwerte mit zunehmender Krümmung der Bahn sich weiter vermindern.

Erwägt man, worin der Grund dieses Verhaltens liegen kann, so wird man darauf zurückgehen müssen, wie sich eigentlich bei einer Beobachtung der hier in Rede stehenden Art die Dinge abspielen.

Wenn wir einen bewegten Gegenstand dauernd fixieren, d. h. ihm mit dem Blicke folgen wollen, so läfst sich niemals ausschliefsen, dafs wir die Augen für eine kurze Zeit wirklich still halten, somit das Netzhautbild sich verschiebt und die Bewegung auf diese Weise bemerkbar wird. Allein auch bei einem ruhenden Gegenstande wird sich das vermutlich nicht wesentlich anders verhalten. Auch hier vielmehr dürften wohl kleine Verschiebungen der Netzhautbilder und kleine die Augenstellung wieder berichtigende Innervationen fortwährend stattfinden. Wenn daher behufs dauernder Fixation solche Innervationen unter allen Umständen erforderlich sind, gleichviel, ob der Gegenstand an seiner Stelle verharrt oder sich langsam verschiebt, so wird es eben darauf ankommen, ob diese leichten Bewegungen oder Bewegungsantriebe wahrgenommen werden können. Unter dieser Voraussetzung erscheint es dann verständlich, dafs wir uns relativ leicht gewöhnen, die Stellung der Augen dauernd in einem Sinne ein wenig zu modifizieren (den Kontraktionsgrad eines Muskels ganz allmählich zunehmen zu lassen), ohne dies als Bewegung zu empfinden, während eine fortdauernd sich ändernde Bewegungsrichtung leichter wahrgenommen wird.

Auch bei dieser Auffassung versteht es sich, dafs die kleinen Verschiebungen der Netzhautbilder in den ganzen Vorgang eingehen, und es kann daher nicht überraschen, dafs die Geschwindigkeitsschwellen sich beim Dämmerungssehen erhöhen. Doch ist diese Erhöhung bis etwa auf die doppelten Werte von erheblich geringerem Betrage als die Verminderung der räumlichen Unterscheidungsfähigkeit, die ja etwa auf $^1/_4$ bis $^1/_{10}$ veranschlagt werden kann.[1]

Handelt es sich bei den bisher beschriebenen Versuchen um die Frage, mit welcher Genauigkeit Bewegungen des Auges wahrgenommen werden können, so können wir andererseits auch die Frage aufwerfen, mit welcher Genauigkeit oder welchem Präzisionsgrade sie ausgeführt werden können. Für eine Ermittlung dieser Art bietet sich die Möglichkeit in gewissen aus der täglichen Erfahrung sehr bekannten, jedoch meines Wissens bis jetzt nicht des genaueren verfolgten und in dieser Richtung nicht verwerteten Beobachtungen. Wenn die Aufgabe gestellt ist, z. B. eine Reihe in gleichem Abstande nebeneinandergeordneter

[1] Vgl. v. Kries, *Zentralblatt f. Physiologie* 8, S. 694. 1894.

Punkte oder paralleler Linien zu zählen, so kann man dies, wie bekannt, ohne besondere Hilfsmittel (indem man einfach die Reihe der Objekte mit dem Auge durchläuft) ausführen, solange die einzelnen Objekte nicht zu nahe aneinander stehen. Ist dagegen der Abstand ein zu geringer, so stöfst der Versuch, in dieser Weise zu zählen, auf Schwierigkeit; wir kommen, indem wir den Blick von einem auf das folgende Objekt übergehen lassen, in Gefahr uns zu täuschen, und bei noch kleinerem Abstande ist ein Zählen in dieser Weise ganz unmöglich. Wir müssen dann einen beweglichen Gegenstand, eine Nadel oder dgl. als Hilfsmittel benutzen, um der Reihe nach die einzelnen Objekte sicher zu bezeichnen, und gelangen nur so zu einer sicheren Zählung.

Bei der Deutung dieser Tatsache darf man nun, wie ich glaube, von der folgenden Überlegung ausgehen. Das Verfahren des Zählens besteht hier darin, dafs wir zunächst einen Punkt fixieren; wir müssen alsdann den Blick auf den folgenden springen lassen, zählen diesen als zweiten, lassen den Blick auf den wiederum nächsten springen, den wir als dritten zählen usw. Die wesentliche Bedingung des Verfahrens (und diejenige, die bei zu kleinem Abstande der Punkte nicht mehr erfüllt ist) besteht also darin, dafs wir bei der springenden Bewegung des Auges sicher sind, wirklich den benachbarten Punkt mit dem Blicke zu treffen, nicht aber etwa einen zu überspringen oder auf den vorher fixierten wiederum zurückzukehren. Diese Bedingung läfst sich leicht des genaueren zahlenmäfsig formulieren; sie wird jedenfalls nicht mehr erfüllt sein, wenn die impulsive, springende Augenbewegung mit einem zufälligen Fehler behaftet ist, der den halben Abstand zweier Objekte erreicht oder diesem Werte nahe kommt, erfüllt dagegen, wenn die Unsicherheit (der zufällige Fehler) hinter diesem Werte um einen gewissen, nicht gar zu geringen Betrag zurückbleibt.

Gehen wir von dieser Überlegung aus, so wird zunächst aus der Tatsache, dafs der erwähnte Modus des Zählens bei gröfseren Abständen der Objekte leicht möglich ist, bei kleineren dagegen versagt, geschlossen werden können, dafs die Unsicherheit der Bewegung (ihr zufälliger Fehler) nicht dem geforderten Umfange proportional zunimmt (denn in diesem Falle müfste die Ausführbarkeit für alle Intervalle übereinstimmend gegeben sein oder fehlen), sondern für die kleineren Intervalle relativ gröfser ist.

Finden wir ferner den kleinsten Winkelabstand zweier benachbarter Objekte, bei dem das Zählen noch möglich ist, $= \alpha$, so würde zu schliefsen sein, dafs eine Bewegung um den Winkel α mit einem Fehler $< \frac{\alpha}{2}$ ausgeführt werden kann, während die relative Genauigkeit für gröfsere Winkel gröfser, für kleinere geringer sein würde.

Mit der Untersuchung der Genauigkeit, mit der Augenbewegungen ausgeführt werden können, und somit mit der Feststellung des kleinsten Winkelabstands zwischen zwei Objekten, der ein Zählen noch gestattet, beschäftigen sich die nachstehenden Versuche.

Sie wurden in der Weise angestellt, dafs der Ort der Beobachtung stets derselbe blieb, während der Standpunkt der Objekte nach Bedarf gewechselt wurde. Letzteres wurde erreicht mittels eines in Schienen laufenden Schlittenapparates, den der Beobachter von seinem Platze aus durch eine Schnurübertragung vor- und rückwärts ziehen konnte. An dem entfernteren Ende des Schlittens war eine Tafel mit den zu zählenden Objekten befestigt, während weiter nach dem Beobachter zu, etwa 15 cm von der Tafel entfernt, ein Diaphragma mit einer quadratischen Öffnung von 6 cm Seitenlänge aufgestellt war, durch welche die Objekte beim Zählen gesehen wurden. Diese Vorrichtung bezweckte, dafs nicht stets die schnell bekannt gewordene ganze Anzahl der auf der Tafel vorhandenen Objekte, sondern eine mit der Stellung des Schlittens wechselnde Reihe sichtbar war. War durch Verschieben des Schlittens die erforderliche Stellung erzielt, so konnte diese, also der Abstand der Tafel vom Auge des Beobachters, an einer seitlich am Gleitbrett des Schlittens angebrachten Mafseinteilung abgelesen werden.

Als Objekte wurden zu den Versuchen Punkte von 1 mm Durchmesser und Linien von 1 mm Breite genommen und zwar schwarz auf weifsem Grund. Der Abstand der Mittelpunkte resp. Mittellinien war im allgemeinen 9 mm; nur bei einigen Versuchsreihen nötigten die beschränkten räumlichen Verhältnisse dazu, Objekte mit einem Abstande von 11 resp. 7 mm zu nehmen. In diesem Fall ist also das Verhältnis der Gröfse der Objekte zu deren Abstand etwas verschoben.

Der einzelne Versuch wurde so vorgenommen, dafs ausgehend von einer Entfernung zwischen Auge und Objekt, die weit ober-

halb der gesuchten Werte stand, der Abstand vergrößert wurde bis der Punkt erreicht war, jenseits dessen Zweifel an der Richtigkeit der Resultate auftraten. Die Lage dieses Punktes, sowie des entfernteren, bei dem die Möglichkeit zu zählen gänzlich aufhört, ist festgestellt worden.

Da zu erwarten war, daſs die Genauigkeit der Augenbewegungen je nach den Richtungen, in denen sie erfolgen, sich verschieden groſs erweisen würde, sind diesbezüglich verschiedene Versuchsreihen ausgeführt worden. Die Tafeln wurden abwechselnd so aufgestellt, daſs das Zählen in horizontaler und vertikaler Richtung, sowie in einer diese unter einem Winkel von 45° schneidenden Richtung geschah. Dabei wurde im allgemeinen auſser acht gelassen, ob an dem einen oder anderen Ende der Reihe mit Zählen begonnen wurde. Nur bei wagrechten Linien (vertikaler Richtung des Zählens) sind, da sich hier zwischen auf- und absteigendem Zählen ein Unterschied herauszustellen schien, diese beiden Fälle gesondert geprüft und geführt worden.

Aus der auf die beschriebene Weise gefundenen mittleren Entfernung zwischen Objekt und Beobachter und der gegebenen Distanz zweier Objekte ist in analoger Weise wie bei den vorher besprochenen Versuchen der Winkelabstand der Objekte und damit der Umfang der Augenbewegung ermittelt worden.

Die Versuche sind binokular ausgeführt. Beschaffenheit der Augen: rechts Myopie von 1 Dioptrie, links Astigmatismus mit Myopie von 3 resp. 0,75 Dioptrien. Die Refraktionsanomalien sind korrigiert. Die Sehschärfe beträgt links $^7/_7$, rechts $^7/_8$.

In den beiden folgenden Tabellen sind die Resultate enthalten und zwar die Mittelwerte aus je 100 Einstellungen. Es sei betont, daſs auch in der auf Linien bezüglichen Tabelle die Bezeichnungen horizontal und vertikal die Richtung des Zählens und der Augenbewegung bezeichnet, nicht die der Linien, die vielmehr auf jener senkrecht steht.

Natürlich wäre es erwünscht, ähnliche Bestimmungen auch auf andere Fälle auszudehnen und insbesondere auch zu ermitteln, mit welcher Genauigkeit gröſsere Bewegungen ausgeführt werden können. Hierfür bietet sich eine Möglichkeit, wenn wir unser Zählverfahren so modifizieren, daſs wir den Blick nicht von einem Objekt auf das nächstbenachbarte, sondern mit Auslassung eines auf das übernächste, mit Überspringung zweier auf das dritte usw. springen lassen. Es ist bekannt, daſs man

auch so (nach Paaren oder nach Triaden) unter geeigneten Bedingungen, nämlich bei genügendem Winkelabstand der Objekte leicht zählen kann und vielfach zu zählen gewohnt ist; jedoch überzeugt man sich leicht, dafs diese Zählung nach Paaren schon gröfsere Winkelabstände erfordert als die Einzelzählung, die Zählung nach Gruppen zu dritt noch gröfsere. Ich habe auch für diese Zählungsmodalitäten die Grenzen in einer gröfseren

Tabelle VII. Linien.

Richtung des Zählens	horizontal		Vertikal absteigend		Vertikal aufsteigend		schräg	
	sicher	unsicher	sicher	unsicher	sicher	unsicher	sicher	unsicher
Abstand der Linien voneinander	9 mm	9 mm	9 mm	9 mm	9 mm	7 mm	9 mm	7 mm
Abstand vom Beobachter in cm	324	384	325	384	334	329	317	326
Winkelabstand der Linien	9′ 32″	8′ 2″	9′ 30″	8′ 2″	9′ 12″	7′ 16″	9′ 44″	7′ 30″

Tabelle VIII. Punkte.

Richtung des Zählens	horizontal		vertikal		schräg	
	sicher	unsicher	sicher	unsicher	sicher	unsicher
Abstand der Punkte voneinander	11 mm	9 mm	11 mm	9 mm	11 mm	9 mm
Abstand vom Beobachter	349	360	397	363	332	332
Winkelabstand benachbarter Punkte	10′ 50″	8′ 34″	10′ 50″	8′ 30″	11′ 20″	9′ 16″

Zahl von Beobachtungen ermittelt. Die Versuche sind in genau der gleichen Weise angestellt wie die vorhergehenden. Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen zusammengestellt, in denen die Winkelgröfsen den Umfang der jedesmal geforderten Augenbewegung bedeuten, also in dem einen Falle (Zählung nach Paaren) den doppelten, im anderen (Zählung nach Dreiergruppen) den dreifachen Abstand zweier benachbarter Objekte. Die Un-

sicherheit der Bewegung würde also im einen Falle sich einem Viertel, im anderen einem Sechstel dieses Betrages nähern.

Tabelle IX. Linien.

Zählung nach Paaren	horizontal		vertikal		schräg	
	sicher	unsicher	sicher	unsicher	sicher	unsicher
Abstand der Linien voneinander	9 mm	9 mm	9 mm	7 mm	9 mm	9 mm
Abstand vom Beobachter	348	384	362	333	352	388
Umfang der geforderten Augenbewegungen	17' 52"	15' 45"	17' 10"	14' 26"	17' 40"	15' 48"

Tabelle X. Punkte.

Zählung nach Paaren	horizontal		vertikal		schräg	
	sicher	unsicher	sicher	unsicher	sicher	unsicher
Abstand der Punkte voneinander	9 mm	9 mm	9 mm	9 mm	9 mm	
Abstand vom Beobachter	326	356	328	363	322	349
Umfang der geforderten Augenbewegungen	18' 31"	17' 18"	18' 50"	17' 2"	19' 14"	17' 44"

Tabelle XI. Linien.

Zählung nach Dreiergruppen	horizontal		vertikal		schräg	
	sicher	unsicher	sicher	unsicher	sicher	unsicher
Abstand der Linien voneinander	9 mm	9 mm	9 mm	9 mm	9 mm	9 mm
Abstand vom Beobachter	170	264	183	264	160	196
Umfang der geforderten Augenbewegungen	55'	45' 22"	38' 8"	35' 9"	57' 46"	47' 26"

Tabelle XII. Punkte.

Zählung nach Dreiergruppen	horizontal		vertikal		schräg	
	sicher	unsicher	sicher	unsicher	sicher	unsicher
Abstand der Punkte voneinander	9 mm	9 mm	9 mm	9 mm	9 mm	9 mm
Abstand vom Beobachter	159	212	172	230	159	201
Umfang der geforderten Augenbewegungen	57′ 46″	41′ 16″	53′ 38″	39′ 50″	57′ 14″	46′ 4″

Zusammenfassend würden wir also sagen können, dafs bei Augenbewegungen der hier geprüften Art, wenn die geforderte Exkursion = 9′ ist, die Unsicherheit sich auf etwa die Hälfte dieses Betrages, also 4′ 30″ belaufen würde, bei Exkursionen von 17′ auf $^1/_4$ dieses Betrages, also 4′ 15″, bei Exkursionen von 50′ auf $^1/_6$ hiervon, also 8′ 20″.

Auch diese Beobachtungen lassen erkennen, wie die Genauigkeit der Bewegungen im Verhältnis zum Umfange derselben berechnet mit zunehmender Gröfse der Bewegungen wächst. Die Unsicherheit, die sich bei Bewegungen von 9 Bogenminuten auf etwa die Hälfte des geforderten Umfanges beläuft, ist auf ein Viertel des Umfanges gesunken, wenn dieser etwa den Betrag von 17 Minuten erreicht hat (der absolute Betrag des Fehlers ist hierbei nicht gröfser, sondern eher noch kleiner als bei den halbsogrofsen Bewegungen) und auf ein Sechstel des Bewegungsumfanges oder 16,6 %, wenn die Bewegung auf etwa 54 Minuten vergröfsert ist.

Die Präzision der Augenbewegungen erscheint, in diesem Sinne betrachtet, nicht vorzugsweise grofs. Es wäre nicht ohne Interesse, sie mit derjenigen von anderen Bewegungen (z. B. der Extremitäten) zu vergleichen. Es können in dieser Hinsicht wohl am ehesten Beobachtungen herangezogen werden, die im hiesigen physiologischen Institut vor längerer Zeit von Schönig [1] angestellt worden sind. Dieser stellte sich u. a. die Aufgabe, eine gröfsere Zahl von Fingerbewegungen möglichst gleichen Umfangs auszuführen und zwar teils langsam, so dafs eine sensible Kontrolle der Bewegung möglich war, teils auch in „schnellender“ oder impulsiver Weise, so dafs eine solche wohl ausgeschlossen war.

[1] Schönig, Zur Lehre von der Regulierung der willkürlichen Bewegungen. Diss. Freiburg. 1892.

Der letztere Fall würde dem von mir in bezug auf die Augenbewegungen geprüften wenigstens einigermafsen vergleichbar sein. Schönig gibt die mittleren Fehler an, die er bei solcher Versuchsweise erhielt. Es zeigte sich durchweg, dafs diese mit zunehmender Gröfse der Exkursionen nicht diesen proportional, sondern langsamer wachsen. Die prozentische Genauigkeit nahm also mit wachsendem Umfang der Bewegung zu, wie dies in meinen Versuchen gleichfalls bemerkbar ist. Die Gröfse des Fehlers belief sich bei Schönig in den ersten Versuchen auch bis auf 34 %, wurde allerdings durch die fortschreitende Übung beträchtlich vermindert.

Man darf jedoch nicht übersehen, dafs, wie ja die Beobachtungen in erster Linie herausstellen, die zufälligen Fehler nicht dem Umfange der Bewegung proportional wachsen und somit die prozentuale Bezeichnung uns keine zutreffende Anschauung von der Genauigkeit der Bewegungen gibt. Vielmehr ist zu beachten, dafs die hier (beim Auge) geprüften Bewegungen durchgängig aufserordentlich kleine sind. In der Ausführbarkeit so geringer Drehungen um wenige Winkelminuten müssen wir wohl unter allen Umständen eine sehr feine und genaue Beherrschung der Innervationen erblicken, selbst wenn dabei die Ungenauigkeit prozentisch einen relativ hohen Betrag erreicht. Sodann wird man auch in Betracht ziehen müssen, dafs die hier geprüften Bewegungen, bei denen der Blick einem zuvor in geringer Exzentrizität gesehenen Gegenstande zugewendet wird, wohl nicht diejenige Art der Bewegung darstellt, die für uns die wichtigste ist und auch nicht diejenige, die zu dem höchsten Grade der Feinheit ausgebildet sein mag. Möglich ist wohl, dafs (wie vorhin schon angedeutet wurde) bei dem Bemühen einen Punkt streng zu fixieren Abweichungen von der richtigen Stellung, die kleiner sind als 9 Minuten, wahrgenommen und durch die geeigneten Bewegungen ausgeglichen werden, wobei denn Bewegungen von noch geringerem Umfange mit einem einer bestimmten Anforderung annähernd entsprechenden Umfange ausgeführt werden müfsten. Hierüber könnten wohl nur Versuche Aufschlufs geben, in denen die Stellung des Auges bei der Absicht einen bestimmten Punkt dauernd zu fixieren objektiv kontrolliert würde, eine Aufgabe, die zwar nicht unlösbar, aber mit nicht ganz geringen technischen Schwierigkeiten behaftet sein dürfte.

Druck von Lippert & Co. (G. Pätz'sche Buchdr.), Naumburg a. S.